



·先进同步辐射物理及技术·

合肥先进光源前端光子吸收器的设计及热分析*

马文静¹, 赵 壮¹, 王思慧¹, 张善才¹, 范 乐¹, 洪远志¹, 尉 伟²

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029; 2. 深圳综合粒子设施研究院, 深圳 518107)

摘 要: 合肥先进光源 (HALF) 将建设成为 1 台第四代衍射极限储存环光源。HALF 的引出光具有更高亮度, 能给储存环带来更高的热负载。引光段需设置光子吸收器, 以限定引出光的尺寸和吸收其余未使用的同步光, 同时减少同步光热负载对储存环超高真空系统的影响。紧凑的衍射极限储存环的物理设计及光子吸收器与真空室连接方式的选择给光子吸收器的设计带来了一系列挑战。在插入式双片型吸收器结构的基础上, 综合考虑吸收面形状、水冷结构、安装定位等因素, 设计了一种基于 CuCrZr 材料、与真空室一体、无需单独定位的光子吸收器, 并计算其位于弯转角 2.74° 的弯转磁铁下游光引出段处, 被同步光照射的光斑尺寸和辐射功率; 采用有限元分析方法对光子吸收器进行热力学模拟, 得到辐照后的最高温度约为 80 °C, 最大应力为 20.8 MPa, 最大热变形为 0.05 mm。结合制作材料 CuCrZr 在高温负载下的许用准则, 确定了光子吸收器结构的合理性。此研究为合肥先进光源中前端光子吸收器的设计提供了重要的理论依据。

关键词: 合肥先进光源; 前端区; 光子吸收器; 直接水冷; 有限元分析

中图分类号: TL76

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220057

Design and thermal analysis of front-end photon absorber at HALF

Ma Wenjing¹, Zhao Zhuang¹, Wang Sihui¹, Zhang Shancai¹, Fan Le¹, Hong Yuanzhi¹, Wei Wei²

(1. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Advanced Science Facilities, Shenzhen 518107, China)

Abstract: The Hefei Advanced Light Facility (HALF) is a diffraction limited storage ring (DLSR). The extracted light of HALF has higher brightness resulting in higher heat load to the storage ring. The redundant synchrotron radiation is absorbed by the photon absorber located in the front-end to protect the ultrahigh vacuum system of DLSR. A special design of the photon absorber is required due to the compact physical design. Considering the toothed surface profile, cooling channel, and installation, we propose a photon absorber made of CuCrZr without additional positioning on the basis of the two-piece vertical absorber. The spot size and power of the radiation from the bending magnet with a bending angle of 2.74° are calculated. The thermal-mechanical simulations based on the finite element analysis method show acceptable results. The maximum thermal deformation, temperature, and stress are 0.05 mm, 80 °C, and 20.8 MPa, respectively, indicating that the new absorber works in a safe range. The present study provides a critical theoretical basis for the design of the photon absorber in the front-end of HALF.

Key words: Hefei Advanced Light Source facility, front-end, photon absorber, water cooling, finite element analysis

电子束流在衍射极限储存环中做回旋运动时发出极高亮度的同步辐射光束, 实际应用中一般只将其中特定部分的同步光引入光束线站用于实验研究。位于光引出段的光子吸收器的主要功能是吸收不使用的同步光, 同时定义了输出到光束线站的同步光张角^[1-2]。合肥先进光源 (HALF) 是位于低能区的第四代同步辐射光源, 引出的同步光相比三代光源具有更高亮度。储存环输出的高功率同步光带来的严重热负载可使挡光元件、光学元件产生严重的变形或被烧熔以至破坏, 因此设计要求光子吸收器在满足光束线接收角的基础上, 尽可能吸收多余的辐射功

* 收稿日期: 2022-02-25; 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12175225)

联系方式: 马文静, mawenjing@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 张善才, shancai@ustc.edu.cn;

尉 伟, weiwei@mail.iasf.ac.cn。

率,以保护真空室壁和真空元件。为了完成对同步光的取舍、分束,避免由安装误差导致同步光直接照射在未加保护和水冷的部件上的情况,要求光子吸收器在与真空室连接时能够精准定位^[3]。

目前处理同步光有分布式(即在真空室侧壁上设计水冷结构吸收同步光功率)和集中式吸收同步光(即在储存环设置独立的水冷光子吸收器)两种方式^[3]。国内外衍射极限装置上多同时采用上述两种方式的吸收器,如 Diamond^[4], ALBA^[5]等。其中,独立的水冷光子吸收器按其安装方式又可分为从真空室侧面法兰装入的侧壁(或垂直)光子吸收器(如 Spring-8^[6]等)和从真空室上方法兰装入的水平光子吸收器(如 APS^[7-8]等)。分布式吸收同步光的方式结构简单,仅通过水冷结构吸收转移直接照射到真空室壁上的同步光功率,对热负载的吸收能力有限。独立的水冷光子吸收器可有效降低同步光在吸收面上的功率密度,同时利用冷却水及时带走热量,具有良好的热缓释效果,但却面临着与真空室连接方式的选择问题。目前广泛使用的独立水冷光子吸收器多为双片型,通过法兰与真空室连接。考虑到精准定位的重要性(光提取口的位置精度),对吸收器加工、法兰及安装的要求较高^[2]。

为增强热缓释效果,独立水冷光子吸收器的设计从提高热传递效率和降低功率密度的角度出发,采用的方法主要有选择合适的材料制造吸收体、采取适当的冷却方式、增大受光表面面积等。引光段光子吸收器吸收体应选择热传导系数较高的材料,优良的导热性能够大量散热、增强冷却效果。国内外的同步辐射光源装置上用于制造光子吸收器的材料多选用无氧高导铜(OFHC)和氧化铝颗粒弥散铜(Glidcop),尤其是 Glidcop 以其具有高强度、高导热性和低放气率,可以承受更高功率密度的优点得到广泛的应用,但受限于加工和焊接的工艺难度及高成本。在冷却方式的选择上,相比于间接冷却,直接冷却传热温差小、冷却速度更快,能够及时带走热量,将光子吸收器的温度限制在较低水平^[3]。由于水具有低成本、化学性质稳定、体系简单等优点,使水冷在光子吸收器中得到广泛应用。优化水冷槽的结构,如槽间距、槽最高点距、槽-受光面间距和冷却介质流动状态等,均可有效降低吸收体表面最高温度,增强水冷效果^[9]。理论上同步光在吸收面上照射的光斑面积越大,功率稀释效果越好,但需要的吸收体纵向尺寸越大,质量越大,紧凑的储存环物理设计限制了光子吸收器的尺寸。

合肥先进光源(HALF)处于规划建设阶段,正在进行相关关键技术的研究工作。为满足 HALF 工程的设计和应用要求,需要对光引出段的光子吸收器进行设计及可靠性分析。在考虑光吸收面形状、水冷结构、安装定位等基础上,设计了一种整体式光子吸收器,参考其位于弯转角 $\theta=2.74^\circ$ 的弯转磁铁下游光引出段处的受光光斑尺寸及辐射功率,应用有限元分析软件 ANSYS 对光子吸收器进行热学、热力学模拟,得到辐照后的温度场、变形和应力应变分布。

1 光子吸收器结构设计

光子吸收器的结构如图 1 所示,光子吸收器由上下两部分组成,通过电子束焊焊接的方式与上下游真空室形成一体,光子吸收器与束流及引光真空室间无需额外定位。为降低同步光在光子吸收器上的功率密度,在垂直方向上采用掠入射结构,前部斜面倾角 2° ,后部斜面上的齿部齿斜倾角 4° ,上下两部分齿和槽相互啮合,齿部设计在水平方向上滚摆角 9° 。此结构使同步光照射到交错齿面,增大同步光的照射面积,双向咬合结构能在有限空间内得到较小的光照射面功率密度,相较于单齿结构降低了 $1/2$,远好于平面吸收结构;同时使杂散同步光在吸收器内部经多次散射后被吸收,以减少穿过吸收器的杂散光,从而减小对真空室的热影响^[2]。将光提取口出射面倾角增大到 10° ,使碰撞到光子吸收器末端同步光不会直接反射到下游真空室而是反射到吸收器上,达到准直光束、保护下游真空室的目的^[10]。齿部滚摆角的设计保证垂直入射的同步光一定被吸收器齿面吸收,避免同步光照射吸收器最末端造成“盲视”而引起温度升高的情况。吸收体下端开设抽气孔,通过法兰连接离子泵,同步光通道开 D 型孔,电子束通道开 3 mm 抽气缝,增大抽气速率^[11]。

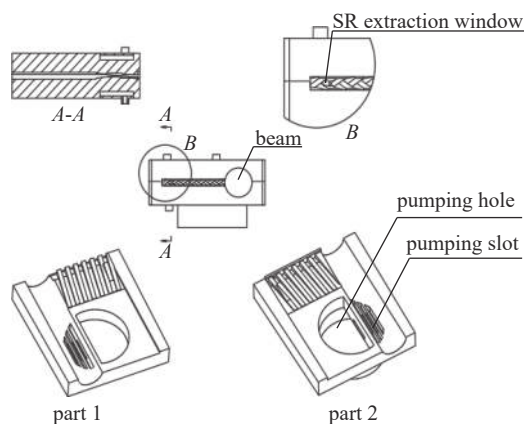


Fig. 1 Model of photon absorber

图 1 光子吸收器模型

在光子吸收器外部受光面正上方和正下方分别开水道冷却槽,如图 2 所示,冷却水经过 3 次转折流出,增强了

水流的湍流效果，提高了换热效率。

如表 1 所示，相较于 OFHC，CuCrZr 在高温下具有更高的机械强度，刚性好，不易变形；与 Glidcop 相比，CuCrZr 力学性能相当，导热系数和软化温度略低，但其屈服强度和抗拉强度较高。综合光子吸收器的热负载要求、HALF 中真空室 NEG 膜的激活过程中其所承受的温度以及经济性考虑，选用导热性能较好、焊接技术成熟、热处理后能恢复其初始性能的 CuCrZr 作为光子吸收器的结构材料^[12]。

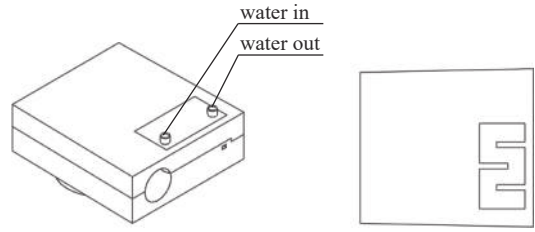


Fig. 2 Structural drawing of the cooling channel

图 2 水冷结构

表 1 材料力学参数^[13]

Table 1 Mechanical parameters of materials

material	density/ (kg·m ⁻³)	elastic modulus/ GPa	Poisson's ratio	yield stress/ MPa	thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	thermal expansion coefficient/°C ⁻¹
OFHC	8940	115	0.343	340	391	17.7×10 ⁻⁶
Glidcop	8900	130	0.33	420	365	16.6×10 ⁻⁶
CuCrZr	8900	128	0.33	350	330	17.0×10 ⁻⁶

2 同步光功率及光斑尺寸计算

2.1 同步光功率计算

束流经过弯转磁铁(弯铁或 BM)时,受到垂直方向上均匀的二级磁场作用,在水平方向上发生偏转,沿行进轨道切线方向损失能量而形成光束辐射,在轨道平面内形成一片均匀的扇形辐射区。整块弯铁发出的同步辐射(BSR)形成一个垂直张角 $2/\gamma$ (γ 为电子相对能量,即束流电子能量和电子静止能量之比),水平张角为弯铁弯转角的矩形锥光束。同步辐射在垂直张角内的功率密度呈高斯分布,而水平张角内的功率密度呈均匀分布^[14-15]。

光子吸收器所承受的热负载可用同步辐射总功率表示,图 3 是电子束流通过弯转角 $\theta=2.74^\circ$ 的弯转磁铁辐射 BSR 在垂直张角内的功率分布图。其中, ψ 为 BSR 垂直张角(rad),在垂直张角内的功率密度 $P(\psi)$ 是 ψ 的函数。

BSR 在 $\psi=0$ 处功率密度 $P(\psi=0)$ 是 $P(\psi)$ 的峰值,由图 3 可知, $P(\psi=0)$ 取 0.036 kW/mrad², $2/\gamma$ 为 1.2 mrad。BSR 在任意 θ 处垂直张角功率 $P(\psi_{all})$ 相等,是 $P(\psi)$ 在 $\pm\psi_0$ 内(即 $1/\gamma$)的积分,图 3 中以 $P(\psi=0)$ 为高, $2\times 0.77/\gamma$ 为宽的矩形面积和曲线与 ψ 轴的面积近似相等^[14],则

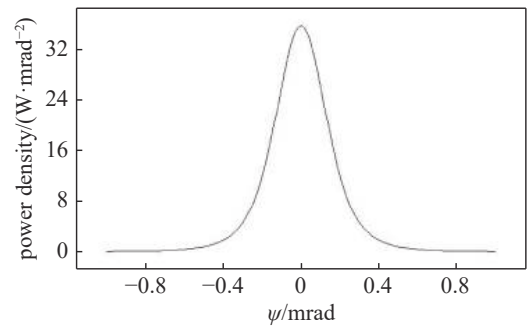


Fig. 3 BSR power distribution in vertical open angle

图 3 BSR 在垂直张角内的功率分布

$$P(\psi_{all})=P(\psi=0)\times\left(2\times\frac{0.77}{\gamma}\right)\times 10^3=33.3\text{ (W/mrad)}\theta \quad (1)$$

弯铁弯转角 $\theta=2.74^\circ$,即 47.8 mrad,则有

$$P = 1588.7\text{ W} \quad (2)$$

综上,弯转角 $\theta=2.74^\circ$ 的弯铁发出同步辐射的功率为 1588.7 W。

2.2 同步光光斑尺寸计算

弯转磁铁同步光 BSR 如图 4 所示,光子吸收器与同步光源点的距离 $d=1.64\text{ m}$,弯铁弯转角 $\theta=2.74^\circ$,垂直张角 ψ (即 $2/\gamma$) $=0.07^\circ$ 。

由于 θ, ψ 较小,则可近似为

$$x=2d\tan\frac{\theta}{2}=78\text{ mm} \quad (3)$$

$$y=2d\tan\frac{\psi}{2}=2\text{ mm} \quad (4)$$

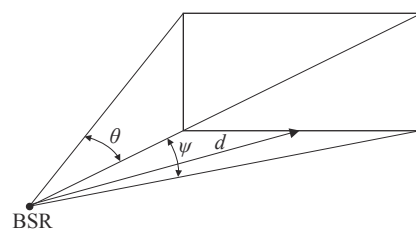


Fig. 4 Diagram of BSR beam

图 4 BSR 光束示意图

同步光照射的束斑尺寸为78(H) mm×2(V) mm。

综上,同步光引入光束张角47.8(H)mrad×1.2(V) mrad,光子吸收器距离光源点1.64 m,照射束斑尺寸为78(H)mm×2(V) mm。

3 光子吸收器有限元模拟

3.1 热、应力分析

采用有限元分析软件 ANSYS 进行数值模拟。取光子吸收器整体为分析对象,建立有限元模型,吸收体材料为 CuCrZr,其力学参数见表1。由于吸收器几何结构复杂、齿部尺寸较小,对吸收器上下部分分别采用四面体网格划分 Patch Independent 算法、六面体主导的网格划分 Hex dominant Method 的方式进行网格划分,如图5(a)所示。为了提高计算精度,在热载荷区域(高温梯度)采用比其他区域更细化的网格,控制受光表面网格尺寸为0.5 mm。同步光打在吸收面上转化为热能,实际吸收面上每一点到同步光光源点的距离都不同,其功率密度也各不相同,因此热分析时,假设受辐照面受热均匀,功率负载施加于束斑在吸收器上的投影上,如图5(b)设置热流率条件,功率1588.7 W。

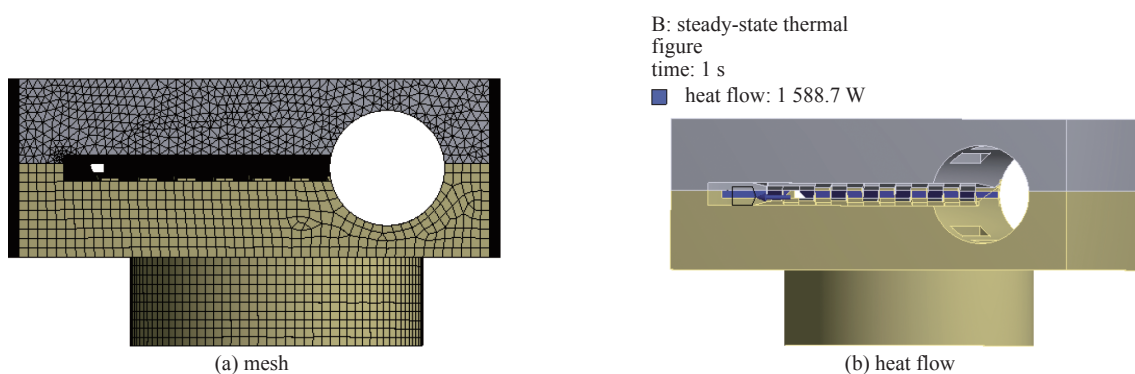


Fig. 5 Mesh and heat flow

图5 网格划分及热流率施加

为模拟冷却水真实工作状态,假设在冷却过程中,流体流动为稳态流动,流体设为湍流模型,选择标准的 $k-\epsilon$ 模型,冷水流进口温度为20℃,水流速为3 m/s,模拟冷却水的温度分布如图6所示。

对于设计的吸收器水冷结构而言,可以用式(5)^[16]通过对比理论计算和模拟得到进出口水流温差来验证模拟的正确性。冷却水进出口温差计算参数如表2所示。

$$\Delta T = \frac{4P}{\pi v \rho c d^2} \quad (5)$$

式中: P 为同步光功率, v 为冷却水的流速, ρ 为冷却水密度, c 为冷却水的比热容, d 为冷却水管的水力直径。

冷却水各参数代入式(5)进行计算得到 $\Delta T \approx 6.4$ ℃,模拟结果如图6所示,进出口温差约等于6.9℃,理论计算与模拟结果较为统一。

图7(a)~图7(c)分别给出了光子吸收器受辐照后的整体和上、下部分温度分布云图。由于热膨胀和不均匀受热,光子吸收器将在不同区域产生不同幅度的形变,同时受内部结构和外部边界条件的影响会产生应力。按照实际工作条件,对光子吸收器与真空室、法兰连接的部位设置固定约束,通过热力耦合分析光子吸收器变形、应力应变分布,结果如图7(d)~图7(f)所示。

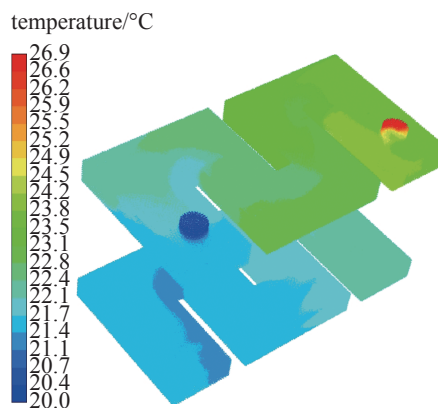


Fig. 6 Cooling water temperature distribution map

图6 冷却水温度分布云图

表2 冷却水进出口温差计算参数

Table 2 Calculated parameters of cooling water between inlet and outlet

P/W	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	d/m	$v/(m \cdot s^{-1})$
1 588.7	1000	4200	0.005	3

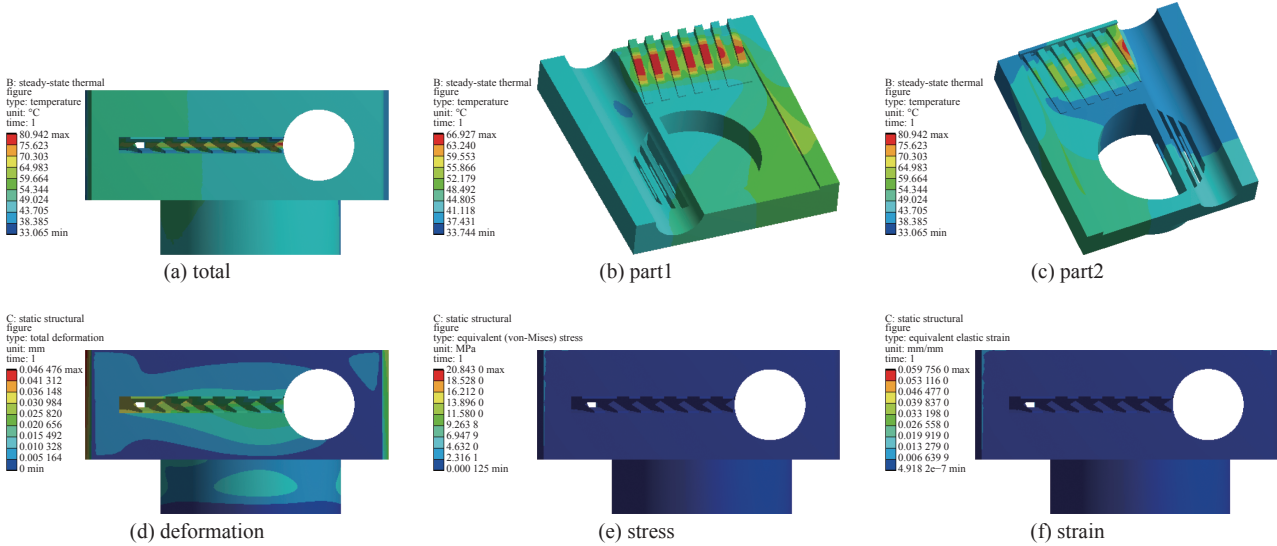


Fig. 7 FEA map

图 7 温度、变形和应力应变分布云图

由图 7 模拟结果可知，光子吸收器最高温度主要分布在受光面直接载荷区域中心，最高温度为 80.9 °C，其最大应力为 20.8 MPa。最高温度和最大应力值均小于可承受最高温度、最大应力，满足 CuCrZr 材料在高热负载下的安全使用准则（见表 3）。模拟得到的最大热变形为 0.05 mm，最大应变为 0.06，表明光子吸收器受辐照后的热变形对结构影响较小。

表 3 工程材料许用标准^[13]

Table 3 Engineering conservative acceptance criteria of material^[13]

material	maximum temperature/°C	maximum von-Mises stress/MPa
CuCrZr	≤250	≤350

3.2 校核

上述仿真结果是在假设受辐照面受热均匀的条件下，将平均功率等值施加在受光面上各点进行计算所得的。实际受光面部分点（最高点）的功率密度更高，上述结果将对光子吸收器结构安全性的判断产生影响，因此有必要对光子吸收器热、应力分布进行复核。

假设受辐照面各点均承受最高功率密度同步光，即 BSR 在任意 ψ 处的功率密度 $P(\psi)$ 均取最高功率密度值 $P(\psi=0)$ ，均为 0.036 kW/mrad²，则 BSR 在任意 θ 处垂直张角功率 $P(\psi_{all})$ 为

$$P(\psi_{all})=P(\psi=0)\left(\frac{2}{\gamma}\right)\times 10^3=43.2\text{ (W/mrad)}\theta \quad (6)$$

弯铁弯转角 $\theta=2.74^\circ$ ，即 47.8 mrad，则同步辐射的功率为

$$P=2\ 065.0\text{ W} \quad (7)$$

保持其他条件不变，按照辐射功率 2065.0 W 设置热流率条件进行有限元分析，计算出光子吸收器的温度、变形以及应力应变云图如图 8 所示。由图 8 模拟结果可知，光子吸收器受辐照后最高温度和最大应力分别为 98.5 °C，27.1 MPa，仍满足许用准则（见表 3）；最大热变形为 0.06 mm，最大应变为 0.08。

4 结论

设计了一种适用于合肥先进光源的整体式光子吸收器，其结构为互相啮合的双片型齿形结构，与目前广泛采用的吸收器结构类似。与插入式吸收器相比，整体式吸收器的引光孔可以通过安装精确定位，无需法兰连接从而节省纵向安装空间，能够在有限空间内充分利用空间以降低功率密度。计算光子吸收器位于弯转角 $\theta=2.74^\circ$ 的弯转磁铁引出段处所吸收同步光的光斑尺寸为 78(H)mm×2(V) mm，辐射功率为 1588.7 W。采用有限元分析方法对其进行热学、热力学分析，模拟光子吸收器受辐照后的温度、变形及应力应变分布，得到的最高温度约为 80 °C，最大应力为 20.8 MPa，低于吸收体制作材料 CuCrZr 在高热负载下的安全使用准则中的 250 °C，350 MPa；得到的最大热

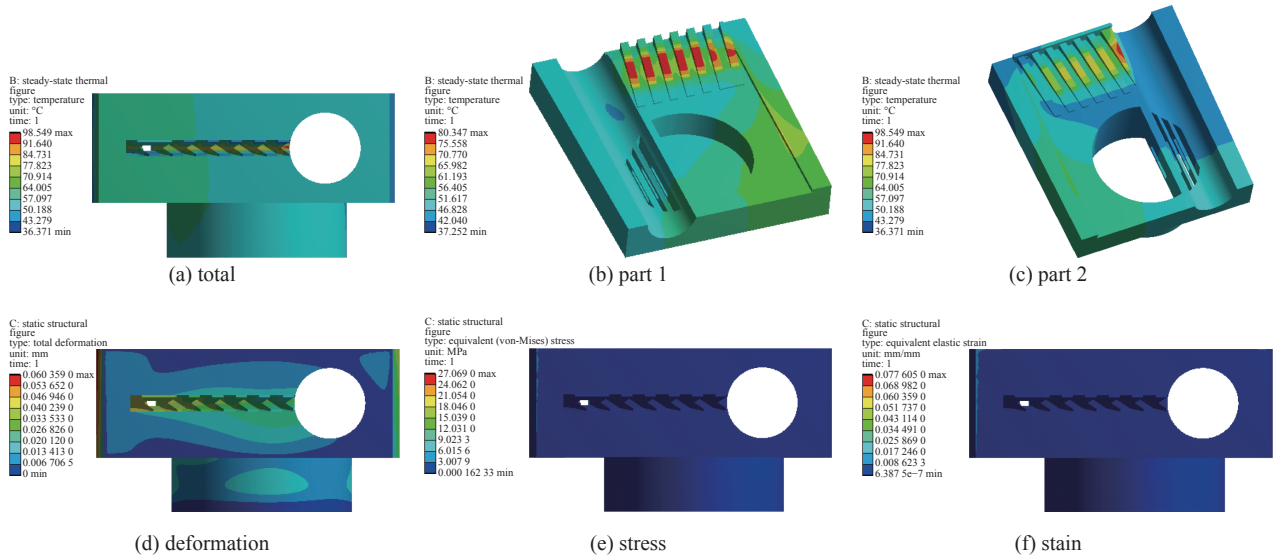


Fig. 8 Calibrated FEA map

图 8 校核温度、变形及应力应变分布云图

变形为 0.05 mm, 最大应变为 0.06, 表明光子吸收器受辐照后的热变形对结构影响较小, 确定了该结构的合理性和安全性。在假设受辐照面各点均承受最高功率密度的同步光的情况下, 对吸收器结构进行复核, 模拟得到最高温度低于 100 °C, 最大应力为 27.1 MPa, 仍满足 CuCrZr 安全使用准则; 最大热变形为 0.06 mm, 最大应变为 0.08, 再次验证了吸收器结构的安全性。

本文研究的光子吸收器结构为 HALF 前端区光子吸收器的设计提供理论依据, 对解决 HALF 中热缓释问题有一定的参考价值。后续将分析各设计参数对吸收器热缓释性能的影响, 以及低阻抗的吸收器束流通道等, 进行光子吸收器结构的优化工作。

参考文献:

- [1] 陈丽萍, 蒋迪奎, 殷立新, 等. 上海光源储存环光子吸收器布局设计[J]. 核技术, 2009, 32(5): 326-332. (Chen Liping, Jiang Dikui, Yin Lixin, et al. Layout of photon absorbers in the SSRF storage ring[J]. Nuclear Techniques, 2009, 32(5): 326-332)
- [2] 陈丽萍. 上海光源储存环光子吸收器结构与研制[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(5): 546-551. (Chen Liping. Photon absorber development for storage ring of Shanghai synchrotron radiation facility[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(5): 546-551)
- [3] 李勇军. 上海光源高热负载前端区的系统设计与研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2016. (Li Yongjun. Design and study of high heat load front-end at SSRF[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016)
- [4] Herbert J D, Malyshev O B, Middleman K J, et al. Design of the vacuum system for Diamond, the UK third generation light source[J]. Vacuum, 2004, 73(2): 219-224.
- [5] Quispe M, Campmany J, Casas J J, et al. Study, design and optimization analysis of the ALBA LOREA dipole vacuum chamber and crotch absorbers based on finite element analysis[C]//Proceedings of the 9th Edit. of the Mech. Eng. Des. of Synchrotron Radiat. Equip. and Instrum. Conference. Barcelona, Spain, 2016: 191-193.
- [6] Mochizuki T, Sakurai Y, Shu D, et al. Design of compact absorbers for high-heat-load X-ray undulator beamlines at SPring-8[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 1998, 5(4): 1199-1201.
- [7] Jaski Y. New front-end design for multiple in-line undulators at the advanced photon source[J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 705(1): 356-359.
- [8] Jaski Y. Thermal analysis of the components of the insertion device front ends FEv1.2 and FEv1.5[R]. ANL/APS/TB-50, 2005.
- [9] 王纳秀. 同步辐射光束线热缓释技术研究及冷却技术的应用[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2006. (Wang Naxiu. Research on cooling technique of SR beamline components and application of cooling technique[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006)
- [10] Quispe M, Campmany J, Gevorgyan, et al. Design of an integrated crotch absorber for ABLA synchrotron light source[C]//Proceedings of MEDSI 2018. Paris, France, 2018.
- [11] Rodrigues A R D, Arroyo F, Bagnato O R, et al. SIRIUS status report[C]//Proceedings of IPAC 2016. Busan, Korea, 2016: 2811-2814.
- [12] Sheng I C, Chang C C, Chan C K, et al. The development of CuCrZr high heat load absorber in TPS[C]//Proceedings of 9th Edit. of the Mech. Eng. Des. of Synchrotron Radiat. Equip. and Instrum. Conf. Barcelona, Spain, 2016.

- [13] Jin Limin, Li Yongjun, Zhu Wanqian, et al. Thermal analysis of the first ultra-high heat-load front-end absorbers for the ultra-hard multi-functional X-ray beam-line at SSRF[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 989: 164955.
- [14] 蒋迪奎, 殷立新. 多极扭摆磁铁同步辐射光的功率分布[J]. 中国科学技术大学学报, 1997, 27(4): 440-444. (Jiang Dikui, Yin Lixin. Synchrotron radiation power distribution from multipole wiggler magnet[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 1997, 27(4): 440-444)
- [15] 陈龙康. 同步辐射光源的尺寸、散射角和中心亮度计算[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(3): 467-472. (Chen Longkang. Calculation of a few parameters of Hefei Synchrotron Light Source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(3): 467-472)
- [16] 薛莹洁. 平面磁控溅射靶的优化设计及膜厚均匀性分析[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017. (Xue Yingjie. Optimization design of planar magnetron sputtering target and analysis of film thickness uniformity[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2017)